

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ШЕВЦОВА АЛІСА ІГОРІВНА

УДК 524.354.4

**МІРА ОБЕРТАННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ПУЛЬСАРІВ У
ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
УЛЬЯНОВ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
завідувач відділу декаметрової радіоастрономії.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, доцент,
ВАВІЛОВА ІРИНА БОРИСІВНА,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
завідувач відділу позагалактичної астрономії та
астроінформатики;

кандидат фізико-математичних наук,
старший дослідник,
ТРОФИМЕНКО СЕРГІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ,
Інститут теоретичної фізики ім. О. І. Ахієзера
ІНЦ ХФТІ,
старший науковий співробітник

Захист відбудеться «14» травня 2021 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «14» квітня 2021р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор фіз.-мат. наук, професор

Юрій АРКУША

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Параметри, що мають місце в самій плазмі магнітосфери пульсара неможливо відтворити в лабораторних умовах, тому спостереження пульсарів у всіх діапазонах є вельми актуальною задачею. Дослідження властивостей області виникнення радіовипромінювання та відриву його від магнітосфери пульсара є дуже важливим для розуміння як природи механізму когерентного радіовипромінювання пульсарів, так і внутрішньої будови самої магнітосфери пульсара. Імпульсний характер випромінювання в системі відліку спостерігача та наявність тонкої структури всередині імпульсів робить пульсари гарними зондами не тільки міжзоряного середовища, але й самої магнітосфери та пульсарного вітру.

Радіовипромінювання пульсарів має ряд особливостей, які є корисними для використання його як зонду середовища поширення. Радіовипромінювання пульсарів когерентне та періодичне, а ступінь лінійної поляризації гігантських та аномально інтенсивних імпульсів росте зі зниженням частоти та сягає близько 100 %. Спектр радіоімпульсів пульсарів широкосмуговий та простягається від декаметрових до міліметрових довжин хвиль.

Найбільш недослідженим для пульсарів є низькочастотний (декаметровий) діапазон хвиль. Якісно зрозуміло, що цей діапазон є найбільш складним для спостережень, тому що імпульсне радіовипромінювання пульсарів завдяки розсіянню та наявності явища нормальної дисперсії перетворюється в цьому діапазоні в континуальне. Середній спектр імпульсної компоненти звичайних (не мілісекундних) радіопульсарів завжди має спадаючу гілку в метровому та декаметровому діапазонах. Окрім цього рівень галактичного фону, який обумовлений синхротронним випромінюванням “вільних” ультра-релятивістських електронів міжзоряної плазми, є вельми високим і, на відміну від спектрів пульсарів, зростає зі зниженням частоти. Наявність галактичного фону не дає змогу реєструвати звичайні індивідуальні імпульси пульсарів (імпульси з інтенсивністю, що є близькою до середньої) в цьому діапазоні. Але саме в цьому діапазоні є ряд переваг, зокрема структура магнітного поля магнітосфери пульсара в цьому діапазоні найбільш наближена до дипольної, тобто є найбільш простою структурою магнітного поля. Окрім того виявилось, що в цьому діапазоні пульсари випромінюють аномально інтенсивні імпульси, які можна зареєструвати над галактичним фоном при наявності радіотелескопа з великою ефективною площею. Саме тому для спостережень аномально інтенсивних імпульсів пульсарів ми використовуємо можливості радіотелескопа УТР-2, який є найкрупнішим в світі і має ефективну площу $\sim 150 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ в декаметровому діапазоні довжин хвиль. Також той факт, що в декаметровому діапазоні найбільший прояв мають ефекти поширення, не тільки ускладнює обробку, але й дає нову інформацію, що не доступна при спостереженнях на більш високих частотах.

В попередніх спостереженнях в декаметровому діапазоні найчастіше досліджувалися середні профілі імпульсів пульсарів. Це дає інформацію про загальний стан середовища поширення та сталі характеристики випромінювання.

Дослідження аномально інтенсивних або гігантських імпульсів, на перевагу цьому, дає інформацію про події на дуже коротких часових масштабах ($\sim 0,3$ мс), що відбуваються недалеко від поверхні пульсара – верхні шари магнітосфери та пульсарний вітер, бо тільки там параметри плазми можуть так швидко змінюватись. Ніде далі на шляху поширення радіовипромінювання (міжзоряне середовище, міжпланетне середовище, магнітосфера та іоносфера Землі) параметри відповідної плазми так швидко змінюватись не можуть. Досліджень поляризаційних характеристик саме індивідуальних імпульсів на даний момент дуже мало, а в декаметровому діапазоні вони взагалі відсутні. Тому обрана тема дисертації заповнює цю інформаційну прогалину і саме через це є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана у відділенні Низькочастотної радіоастрономії Радіоастрономічного інституту НАН України та є складовою частиною наступних проєктів:

- «Дослідження об'єктів Всесвіту методами низькочастотної радіоастрономії» (шифр: КОФР-2, 2012, № держреєстрації 0112U000034) (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (шифр ФАВОРИТ-3, 2013 № держреєстрації 0113U002048) (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр РАДІОТЕЛЕСКОП-16, 2016, № держреєстрації 0116U00) (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Розробка та впровадження елементів і систем великих декаметрових антен» (шифр Фаворит-4, 2017, № держреєстрації 0116U002159) (здобувач – відповідальний виконавець);
- «Створення та використання елементів сучасних радіоастрономічних засобів України УТР-2, УРАН, ГУРТ у вітчизняних і міжнародних низькочастотних астрофізичних дослідженнях» (шифр РАДІОТЕЛЕСКОП-15, 2015, № держреєстрації 0115U004084) (здобувач – відповідальний виконавець).
- «Пошук і дослідження низькочастотного радіовипромінювання пульсарів» (шифр Пульсар-2020, 2020–2021, № держ. реєстрації 0120U100232) (здобувач – відповідальний виконавець).
- «Радіовипромінювання Всесвіту у декаметровому діапазоні хвиль» (шифр: КОФР-3, 2017, № держ. реєстрації 0117U000246) (здобувач – відповідальний виконавець).
- «Дослідження структури космічних радіоджерел в широкій смузі частот за допомогою мережі декаметрових інтерферометрів УРАН» (шифр: МЕРЕЖА-5, № держ. реєстрації 0118U003073) (здобувач – відповідальний виконавець).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи було розробити новий, більш точний метод визначення міри обертання в декаметровому діапазоні на часових масштабах одного імпульсу, застосувати цей метод для визначення міри

обертання радіовипромінювання найближчих до Землі пульсарів та оцінити можливість зондування навколопульсарної плазми.

Для досягнення поставленої мети треба було розв'язати наступні задачі:

1. Розробити моделі для найбільш достовірного опису поляризованого радіовипромінювання пульсарів та середовища їх поширення в декаметровому діапазоні.

2. Розробити алгоритм визначення міри обертання на коротких часових масштабах, який може бути застосований навіть для обробки даних, зареєстрованих радіотелескопом з антеною однієї лінійної поляризації.

3. Провести спостереження найближчих до Землі пульсарів з метою пошуку лінійно поляризованих аномально інтенсивних імпульсів з використанням радіотелескопа УТР-2.

4. Проаналізувати отримані дані спостережень аномально інтенсивних імпульсів у декаметровому діапазоні з метою пошуку наявності впливу середовища поширення, зокрема фарадеївського ефекту модуляції інтенсивності за частотою.

5. Отримати середні оцінки абсолютних значень міри обертання для радіовипромінювання обраних пульсарів і порівняти їх з оцінками інших досліджень для перевірки адекватності розроблених методів.

6. Оцінити швидкі зміни міри обертання в залежності від фази імпульсу для проаналізованих аномально інтенсивних імпульсів та підтвердити можливість зондування областей верхньої магнітосфери пульсара та пульсарного вітру за допомогою таких імпульсів.

Об'єктом дослідження в даній роботі є поляризоване радіовипромінювання пульсарів в декаметровому діапазоні.

Предметом дослідження є міра обертання аномально інтенсивних імпульсів радіовипромінювання пульсарів. Цей параметр досліджується на коротких проміжках часу в залежності від фази імпульсу. Швидкі зміни цього параметра (в масштабах одного імпульсу) свідчать про швидкі зміни електронної концентрації та/або вектора магнітної індукції в навколопульсарній плазмі.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань проводилися спостереження пульсарів у декаметровому діапазоні за допомогою радіотелескопа УТР-2. Для первинної обробки імпульсів використовувалися програми авторки та її колег, опис яких не входить у дисертацію. Для оцінки міри обертання зареєстрованих аномально інтенсивних імпульсів використовувався запропонований в дисертації новий метод оцінки "миттєвих" значень цього параметра. Ці «миттєві» значення міри обертання оцінювались на інтервалах часу $\sim 0,3$ мс.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше в світі визначено абсолютне значення міри обертання для пульсара J0243+6257. Модуль міри обертання складає 4.4 ± 0.3 рад/м². Визначення цього параметра зроблено за допомогою радіотелескопа УТР-2 в діапазоні 16–33 МГц. В інших частотних діапазонах значення цієї величини не оцінювалося, тому не зазначено в жодних каталогах на даний час.

2. Вперше в декаметровому діапазоні дано оцінки абсолютного значення міри обертання для пульсарів J0814+7429 (B0809+74), J0953+0755 (B0950+08). Для пульсара J0814+7429 – $|RM| = 12.3 \pm 0.7$ рад/м², для пульсара J0953+0755 – $|RM| = 2.4 \pm 0.3$ рад/м². В інших частотних діапазонах оцінки цієї величини близькі до отриманих, що підтверджує достовірність результатів досліджень і доцільність застосування розробленого методу для оцінки міри обертання в декаметровому та метровому діапазонах.

3. Вперше відкриті швидкі зміни міри обертання в залежності від фази індивідуального імпульсу для найближчих до Землі пульсарів. Часовий масштаб таких змін складає ~ 0.3 мс. До цього часу не застосовувався підхід, в якому міра обертання має динамічний, а не сталий характер в часових рамках індивідуального імпульсу. Наявність швидких змін міри обертання була підтверджена завдяки аналізу аномально інтенсивних імпульсів за допомогою розробленого чутливого до таких змін методу оцінки цієї величини.

4. Розроблено новий метод визначення швидких змін міри обертання в масштабах одного імпульсу в декаметровому діапазоні, що дає рекордно малу методологічну відносну похибку -40 дБ. Оцінки швидких змін міри обертання при цьому мають набагато вищу точність визначення, ніж оцінки середнього значення. Метод дозволяє отримати оцінки міри обертання навіть при аналізі даних з радіотелескопа, який реєструє лише одну лінійну поляризацією. Новий метод є універсальним, та може застосовуватися для аналізу даних інших радіотелескопів близького частотного діапазону. Чутливість методу дозволяє визначати та досліджувати «миттєві» значення міри обертання в часових масштабах ~ 0.3 мс.

5. Обґрунтовано можливості зондування найближчого до пульсара середовища – верхньої магнітосфери та пульсарного вітру. Для трьох обраних пульсарів J0242+6256, J0814+7429 (B0809+74), J0953+0755 (B0950+08) були отримані залежності міри обертання від фази імпульсу з часовою роздільною здатністю до 0.3 мс.

Практичне значення отриманих результатів

За результатами дисертаційної роботи отримано нові знання про особливості радіовипромінювання пульсарів у низькочастотному діапазоні. Розроблений в дисертаційній роботі метод оцінки міри обертання на коротких інтервалах часу дозволяє досліджувати швидкі зміни магнітного поля та інтегральної електронної концентрації в плазмі, параметри якої швидко змінюються. Це створює передумови для зондування верхньої магнітосфери пульсара та пульсарного вітру. Отримані результати є тестовими для теоретичних уявлень про когерентний механізм радіовипромінювання пульсарів. В більш широкому плані отримані результати можуть бути застосовані до досліджень континуального поляризованого випромінювання та/або випромінювання спектральних ліній. Результати дисертаційної роботи демонструють нові можливості для подальших астрофізичних досліджень.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці та практичній реалізації моделей радіовипромінювання пульсарів і середовища поширення, а також методики визначення міри обертання на коротких часових масштабах, у підготовці, проведенні й обробці спостережень аномально інтенсивних імпульсів пульсарів, в активному зборі й аналізі даних наукової літератури за темою дисертації, в підготовці та участі в написанні статей. Автор, в тому числі й самостійно, проводила радіоастрономічні спостереження найближчих до Землі пульсарів за допомогою радіотелескопа УТР-2, що описані у дисертації. Аналіз й обробка експериментальних даних, отриманих за допомогою радіоастрономічних спостережень на радіотелескопі УТР-2 були проведені особисто автором. Автор брала участь в аналізі, обговоренні, інтерпретації та узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків. Також внесок здобувача полягає в опрацюванні матеріалів для публікацій за темою досліджень, підготовці та представленні результатів роботи на конференціях і семінарах.

Автор дуже вдячна своєму науковому керівнику к.ф.-м.н. О. М. Ульянову за допомогу в постановці задач, обговоренні й аналізі отриманих результатів; Радіоастрономічному інституту НАН України (РІ НАНУ) – за можливість проводити дослідження на унікальному радіоастрономічному інструменті – радіотелескопі УТР-2; колегам із відділення низькочастотної радіоастрономії РІ НАНУ – за цінні поради при підготовці даної роботи та плідні обговорення роботи на наукових семінарах.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися та обговорювалися на науково-кваліфікаційних семінарах, а також на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях:

- Ventspils International Radio Astronomy Conference (Ventspils, Latvia, 13–15 August 2012);
- International Astronomical Union Symposium No. 291 “Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities After 80 Years” (Beijing, China, 20–31 August 2012) — 2 доповіді;
- 1th Ukrainian conference “Electromagnetic Methods of Environmental Studies” (Kharkiv, Ukraine, 26–27 September 2012);
- 12th Kharkiv Young Scientists Conference on “Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics” (YSC-2012) (Kharkiv, Ukraine, 4–7 December, 2012);
- 43rd Young European Radio Astronomers Conference. (Bielefeld, Germany, 30 September–3 October 2013);
- 13-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicphysics, Radio astronomy and Astrobiology” (Odessa, Ukraine, 19–25 August, 2013);
- The COSPAR Symposium: “Cosmic Magnetic Fields: Legacy of A. B. Severny” (Nauchny, Ukraine, 2–6 September 2013);
- 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014) (Kharkiv, Ukraine, 14–17 October 2014);
- International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015), (Dnipropetrovsk, Ukraine, 29 September–2 October 2015);

- II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF -2016) (Kharkiv, Ukraine, 10–14 October 2016);
- 17th Gamow Conference-School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology” (Odessa, Ukraine, 13–20 August 2017).
- 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Lviv, Ukraine, 17–20 October 2017);
- 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology (Odessa, Ukraine, 12–18 August 2018);
- 19th Gamow International Conference in Odessa: “New Trends in Cosmology, Astrophysics and HEP after Gamow” and 19th Gamow Summer School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology” (Odessa, Ukraine 11–19 August 2019);
- XX Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology” (Odesa, Ukraine 9–16 August 2020);
- 10th international Kharkiv symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves MSMW'2020 (Kharkiv, Ukraine 21–25 September 2020), (online due to COVID-19).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 31 науковій праці: 6 – у наукових фахових виданнях України, одне з яких входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science; 4 – у зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science; 21 – публікації апробаційного характеру.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатка. Загальний обсяг роботи складає 154 сторінки, основного тексту – 110 сторінок. Вона ілюстрована 37 рисунками, 4 таблицями. Список використаних джерел містить 108 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання досліджень, наведені наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів роботи.

У розділі 1 наведено огляд наукової літератури за методами визначення міри обертання радіовипромінювання пульсарів у метровому та більш короткохвильових діапазонах. Показано, що в науковій літературі бракує поляризаційних досліджень радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні довжин хвиль, зокрема досліджень міри обертання радіовипромінювання пульсарів на коротких інтервалах часу, в масштабах індивідуальних імпульсів. Коротко представлено інформацію про відкриття

пульсарів, основні теоретичні моделі їх магнітосфери та генерації радіовипромінювання.

У розділі 2 розглянута модель поляризованого імпульсного радіовипромінювання пульсарів та модель слабо анізотропного середовища поширення (міжзоряної, міжпланетної та іоносферної плазми), що можуть бути застосовані для декаметрового діапазону довжин хвиль. Також розроблені і наведені алгоритми оцінки динамічно змінних поляризаційних параметрів імпульсних сигналів та ілюстрація можливості розділення верхніх шарів магнітосфери пульсара.

Було створено модель поляризованого випромінювання та модель середовища поширення для опису прямої задачі поширення радіовипромінювання від джерела до спостерігача. Це дало змогу вирішити і зворотню задачу визначення параметрів цього середовища по зареєстрованому сигналу.

Сигнал створювався поетапно в тривимірній системі відліку, пов'язаною з джерелом. Дві з осей співпадали з площиною поляризації, третя координата розміщувалася в напрямку поширення, таким чином моделювалося квазі-поперечне поширення хвилі. Така перевизначеність системи дала можливість коректно вирішувати поставлені задачі при реєстрації фазованими антенними решітками, поляризація диполів яких фізично не підлаштовується під фронт хвилі. Створений модельний сигнал в двох каналах мав імпульсний характер, заданий хід позиційного кута та дві ортогональні лінійні поляризації, що відповідають еліптичній поляризації. Також сигнал мав заданий коефіцієнт еліптичності, що залежить від фази імпульсу та задане співвідношення сигнал/шум.

При створенні моделі середовища поширення враховувалися два основних ефекти, що мають найбільший вплив при поширенні. Перший ефект - це частотна дисперсійна затримка, яка пояснюється різною груповою швидкістю на різних частотах при наявності «вільних» електронів на шляху поширення. Другий ефект - обертання площини лінійної поляризації, або ефект Фарадея. Він пояснюється наявністю різних коефіцієнтів заломлення для власних мод поляризованого випромінювання при наявності складової вектора магнітної індукції, що є паралельною напрямку поширення. Для аналізу фази гармонічних хвиль при їх поширенні було використано рівняння ейконалу.

$$\frac{d\phi_{O,X}(\omega, z)}{dz} = n_{O,X}(\omega)k(\omega) = n_{O,X}(\omega)\frac{\omega}{c}, \quad (1)$$

де $\phi(\omega, z)$ – фаза відповідної гармонічної складової сигналу;

$k(\omega)$ – хвильове число;

$n_{O,X} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \mp \omega_H)}}$ – коефіцієнти заломлення для звичайної та

незвичайної хвилі;

$\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 N_e / m_e}$ – плазмова циклічна частота;

e – заряд електрона;

N_e – локальна концентрація електронів;

$\omega_H = e |\vec{B}| / m_e \gamma c$ – гіротропна циклічна частота;

\vec{B} – вектор магнітної індукції;

m_e – маса спокою електрону;

γ – Лоренц-фактор електрону;

c – швидкість світла у вільному просторі;

ω – циклічна частота реєстрації.

Після розкладання коефіцієнта заломлення для звичайної та незвичайної хвилі в ряд Тейлора, в рівнянні ейконалу було виділено перші три значущі члени. Ці три складові на загальних підставах описують залежність фази гармонійного сигналу при його поширенні у вакуумі, поправку на вплив ефекту нормальної дисперсії та поправку на ефект Фарадея.

$$\phi_{0,x}(\omega, \psi) \approx \omega \frac{L}{c} - \frac{1}{\omega} \frac{2\pi e^2}{m_e c} \int_0^L N_e(z, \psi) dz \mp \frac{1}{\omega^2} \frac{\pi e^3}{m_e^2 c^2} \int_0^L N_e(z, \psi) \vec{B}(z, \psi) d\vec{z}, \quad (2)$$

де L – відстань від пульсара до спостерігача;

$N_e(z, \psi)$ – електронна концентрація на промені зору в залежності від фази імпульсу ψ ;

z – поточна координата на промені зору,

$\vec{B}(z, \psi) d\vec{z} = |\vec{B}(z, \psi)| \cos(\angle \vec{k} \vec{B}(z, \psi)) d|\vec{z}|$ – проекція напруженості магнітного поля вздовж напрямку поширення в залежності від фази імпульсу.

Два останніх члени включають в себе визначення параметрів міри дисперсії (DM) та міри обертання (RM), які вводять часову затримку в залежності від частоти, та фазовий оберт площини лінійної поляризації. В моделі середовища поширення вони були представлені у зручному вигляді комутуючих матриць розмірності 3×3 .

$$D = \begin{bmatrix} e^{-i\varphi^D(DM, \omega)} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\varphi^D(DM, \omega)} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\varphi^D(DM, \omega)} \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} e^{i\varphi_0^R(RM, \omega)} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_x^R(RM, \omega)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В модельне уявлення про середовище поширення було введено параметр – міра обертання, що не є константою та залежить від фази імпульсу - $RM(\psi)$. Це новий підхід, який більш реалістично враховує можливі прояви швидкої зміни параметрів плазми на шляху поширення радіовипромінювання пульсарів.

Так виглядають модельні уявлення в матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x^0(\psi, \omega, z) \\ \dot{E}_y^0(\psi, \omega, z) \\ \dot{E}_z^0(\psi, \omega, z) \end{bmatrix} \Big|_0 \times PA \Big|_a \times R^* \Big|_b \times D \Big|_c = \begin{bmatrix} \dot{E}_{x'}^c(\psi, \omega, z) \\ \dot{E}_{y'}^c(\psi, \omega, z) \\ \dot{E}_{z'}^c(\psi, \omega, z) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $\dot{E}_x^0, \dot{E}_y^0, \dot{E}_z^0$ – це сигнал в системі джерела випромінювання, в магнітосфері пульсара;

PA – матриця повороту на початковий позиційний кут;

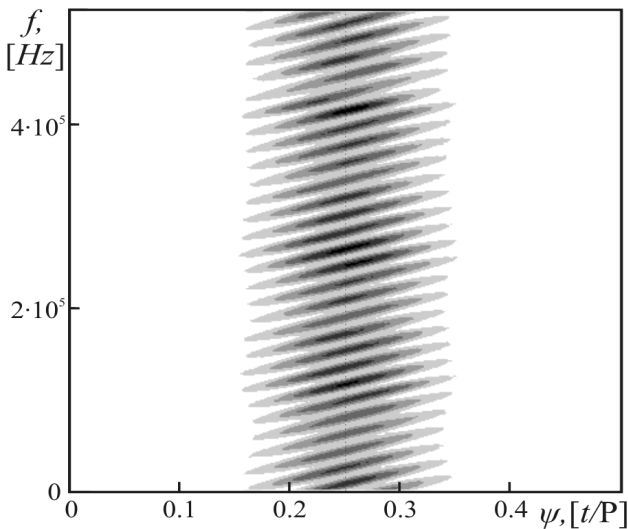
$$R^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -i & i & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot R \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i & 0 \\ 1 & -i & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \text{послідовність матриць, що}$$

описує перехід з лінійного базису в круговий, де зручно враховується ефект Фарадея, та зворотній перехід в лінійний базис;

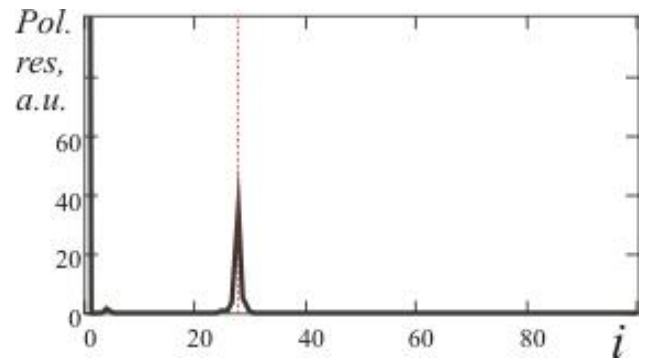
D та R – матриці впливу середовища описані вище;

$\dot{E}_{x'}^c, \dot{E}_{y'}^c, \dot{E}_{z'}^c$ – сигнал в системі координат спостерігача.

Рівняння (4) показує як трансформується сигнал, що поширюється крізь середовище з інтегральними параметрами концентрації електронів та складової магнітного поля, паралельної до напрямку поширення (променя зору). Далі модельний сигнал буде розглядатися у випадку, коли дисперсійна затримка вже скомпенсована, і можна аналізувати вплив окремо ефекту Фарадея на окремий імпульс, що реєструється лінійним диполем.



(а)



(б)

Рис.1 (а) Динамічний спектр модельного сигналу із врахованим впливом ефекту Фарадея. (б) Поляризаційний відгук Фур'є аналізу динамічного спектра з (а) в перетині, який відповідає максимуму інтенсивності сигналу

На рис. 1а показано модельний сигнал, що може бути зареєстрований радіотелескопом з однією лінійною поляризацією. Тепер цей сигнал сприймається як зареєстрований, про який нічого невідомо. З цього модельного зареєстрованого сигналу треба оцінити параметри сигналу та вплив ефекту Фарадея. На першому етапі робився Фур'є аналіз, результат якого показано на рис. 1б. З цього аналізу отримано період фарадеївської модуляції Δf_F , та грубі оцінки міри обертання за відомою формулою:

$$|RM_{est}(\psi)| = \frac{\pi}{c^2} \cdot \left[\frac{f_c^2 (f_c + \Delta f_F(\psi))^2}{(f_c + \Delta f_F(\psi))^2 - f_c^2} \right] \approx \frac{\pi f_c^3}{2c^2 \Delta f_F(\psi)}, \quad (5)$$

де $RM_{est}(\psi)$ – оцінка RM у фазі імпульсу ψ ;

f_c – центральна частота прийому.

Далі ми робимо оцінки еліптичності. На рис. 2 показана спектральна густина потужності (СГП) в фазі максимуму імпульсу з динамічного спектру.

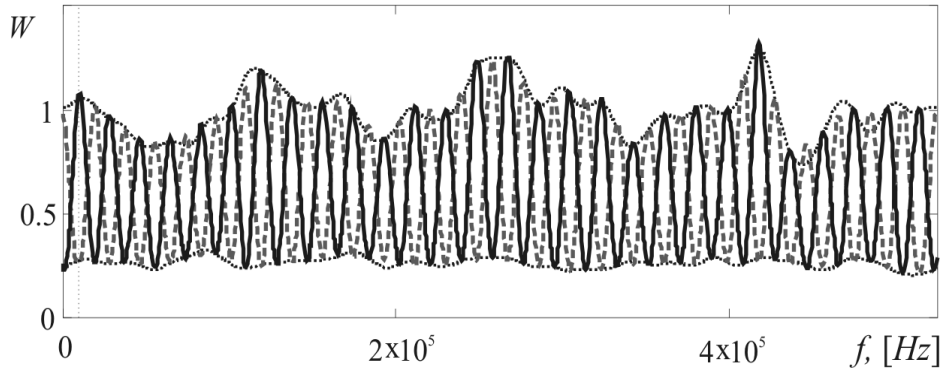


Рис. 2 СГП поляризованого відгуку диполя в фазі максимуму імпульсу

Верхня огинаюча (штрихова крива зверху) — спектральна густина потужності лінійної поляризації А, що пропорційна квадрату модулю довжини більшої напіввісі поляризаційного еліпсу. Аналогічно, нижня огинаюча (штрихова крива знизу) — спектральна густина потужності лінійної поляризації В, що пропорційна квадрату модулю довжини меншої напіввісі поляризаційного еліпсу.

Оцінюючи співвідношення цих огинаючих в кожній фазі імпульсу можна оцінити хід коефіцієнта еліптичності сигналу в залежності від фази імпульсу. Як видно з рис. 3 наші оцінки доволі гарно співпадають з введеним в модельний зареєстрований сигнал ходом коефіцієнта еліптичності при високому співвідношенні сигнал/шум.

Тестовий сигнал створювався за оцінками еліптичності та оцінками міри обертання з Фур'є аналізу. Цей сигнал вже не мав введеного шуму. Тестовий сигнал вписувався в модельний зареєстрований сигнал методом мінімальних середньоквадратичних відхилень (МСКВ). Параметрами пошуку були міра обертання та позиційний кут в залежності від фази імпульсу.

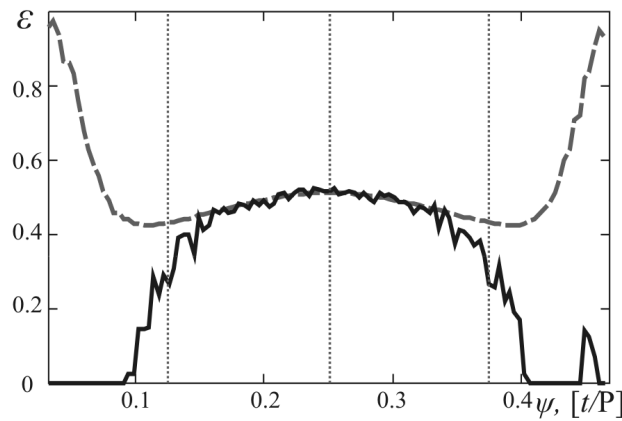


Рис. 3 Порівняння коефіцієнта еліптичності тестового сигналу (суцільна крива), з оригінальним значенням цього коефіцієнта в модельному зареєстрованому сигналі (штрихова крива) на всіх фазах імпульсу

На Рис. 4 представлено порівняння методів Фур'є аналізу та нового запропонованого методу пошуку міри обертання. Видно, що Фур'є аналіз (зелена крива) не показує достовірної картини, на відміну від тестового сигналу (синя), що майже точно співпадає зі спектральною густиною потужності модельного зареєстрованого сигналу в фазі максимуму інтенсивності.

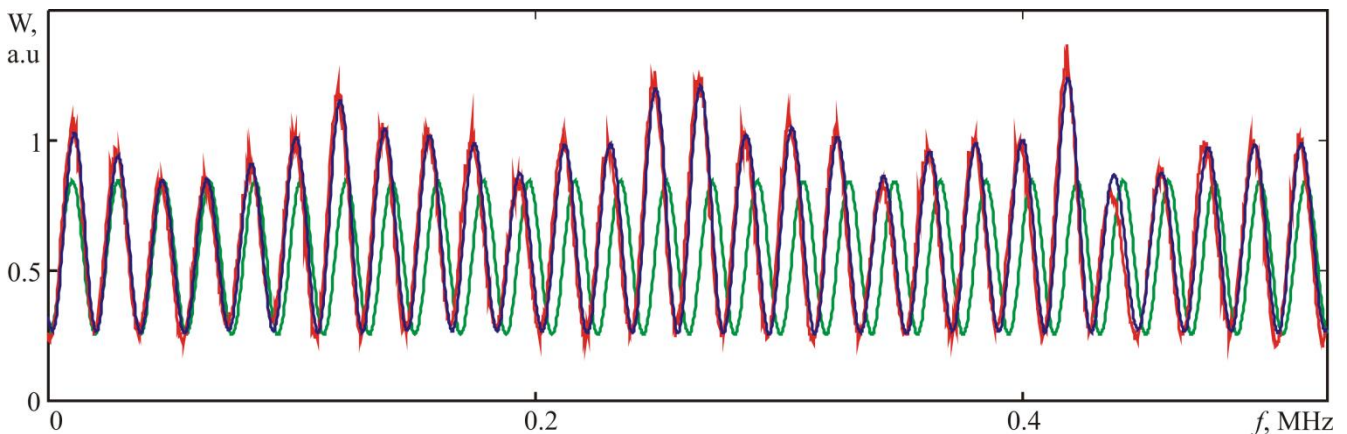


Рис. 4 Порівняння сигналу з двома модельними функціями в центральному перерізі імпульсу. Червона крива – це СГП в фазі максимуму імпульсу модельного зареєстрованого сигналу, синя крива – СГП вписаного тестового сигналу, що отриманий методом МСКВ, зелена крива – це тестовий синусоподібний сигнал з мірою обертання, що отримана з максимального відгуку Фур'є аналізу

Оцінки абсолютних «миттєвих» значень міри обертання та ходу позиційного кута в залежності від фази імпульсу, отримані новим чутливим методом, представлені на рис. 5. Відносна методологічна точність представленого алгоритму складає -40 дБ.

Таким чином розроблений метод має достатню чутливість, щоб оцінювати зміни міри обертання на часових масштабах одного імпульсу. Єдиним недоліком розглянутого нами випадку реєстрації диполем з однією лінійною поляризацією,

який відповідає реальному випадку спостережень радіотелескопом УТР-2, є те, що розроблений метод не дає змоги оцінити знак міри обертання.

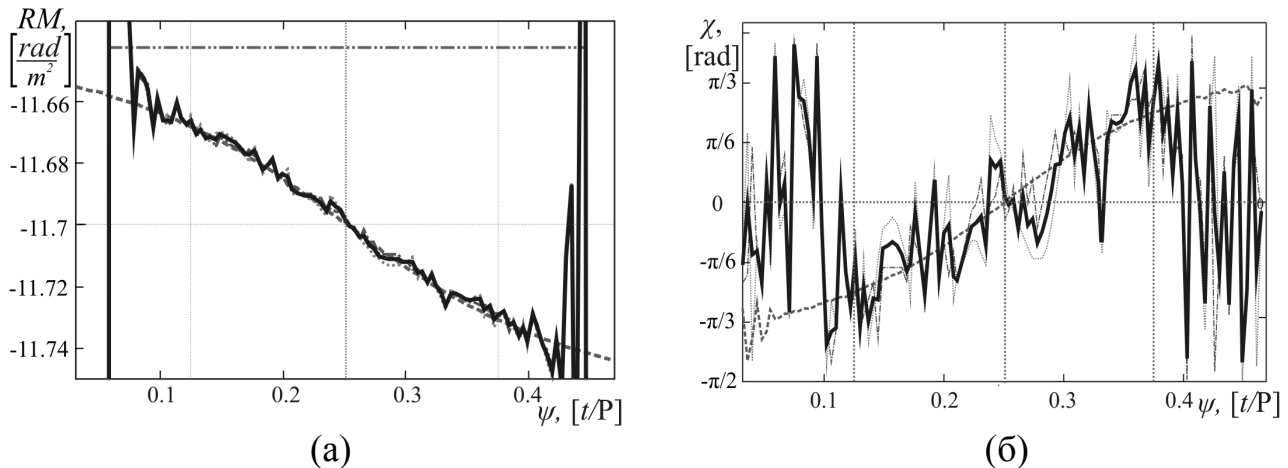


Рис. 5. Порівняння оцінок (чорна жирна крива) абсолютного значення міри обертання (а) та позиційного кута (б) в залежності від фази імпульсу з оригінальними введеними залежностями (штрихова гладка крива) в модельному зареєстрованому сигналі. На (а) також представлені оцінки методом Фур'є аналізу – подвійна штрих-пунктирна лінія

У розділі 3 метод визначення швидких змін міри обертання, запропонований у другому розділі, застосовувався для обробки реально зареєстрованих даних пульсарів у декаметровому діапазоні довжин хвиль.

Для спостережень обиралися найближчі до Землі пульсари: J0242+6256, J0814+7429 (B0809+74), J0953+0755 (B0950+08). Спостереження велися в діапазоні 16 – 33 МГц на радіотелескопі УТР-2 з найбільшою ефективною площею 150 000 м² на 25 МГц, що дозволило реєструвати індивідуальні аномально інтенсивні імпульси з високою часовою та частотною роздільною здатністю. Верхній піддіапазон частот цього радіотелескопа був вибраний для мінімізації розсіяння імпульсів, бо стала розсіяння росте як $\Delta\tau_{sc}(f) \sim 1/f^4$.

Для пульсара J0242+6256 було вперше отримано оцінку абсолютного значення міри обертання, як склала $|RM| = 4.353 \pm 0.289$ рад/м². Також отримано усереднені по двом зареєстрованим в піддіапазонах аномально інтенсивним імпульсам оцінки швидких змін міри обертання. На рис. 6 показано хід модуля міри обертання вздовж профілю імпульсу в трьох сусідніх піддіапазонах.

На рис. 6 спостерігаються стрибки міри обертання, та зниження чутливості до оцінки цього параметра на задніх фронтах імпульсу. Для більш адекватної інтерпретації треба набрати статистику оцінок міри обертання аномально інтенсивних імпульсів в однакових піддіапазонах.

Наступним розглядався пульсар J0814+7429. Було проаналізовано три аномально інтенсивних імпульси. Середні оцінки модуля міри обертання для цього пульсара в декаметровому діапазоні за нашими даними складають $|RM| = 12.32 \pm 0.655$ рад/м². Це значення близьке до тих, що отримані у більш високочастотних діапазонах та містяться в каталозі ATNF.

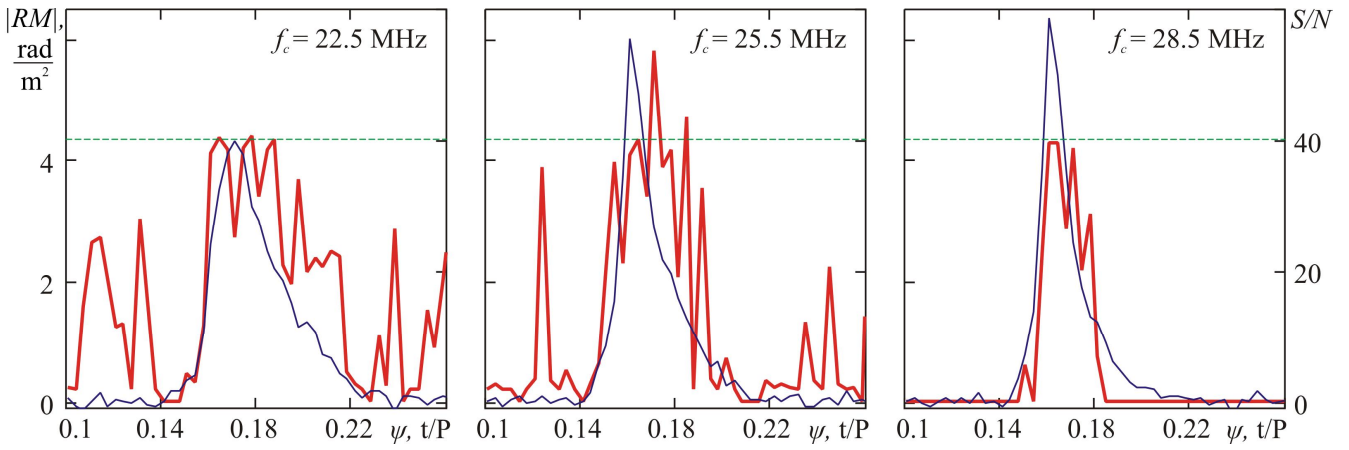


Рис. 6 Хід модуля RM (червона крива) вздовж профілю імпульсу (синя крива) в трьох сусідніх піддіапазонах для пульсара J0242+6256 (зеленим $RM = 4.35$ рад/м²)

На рис. 7 представлено оцінки миттєвих значень міри обертання для трьох імпульсів в чотирьох обраних піддіапазонах.

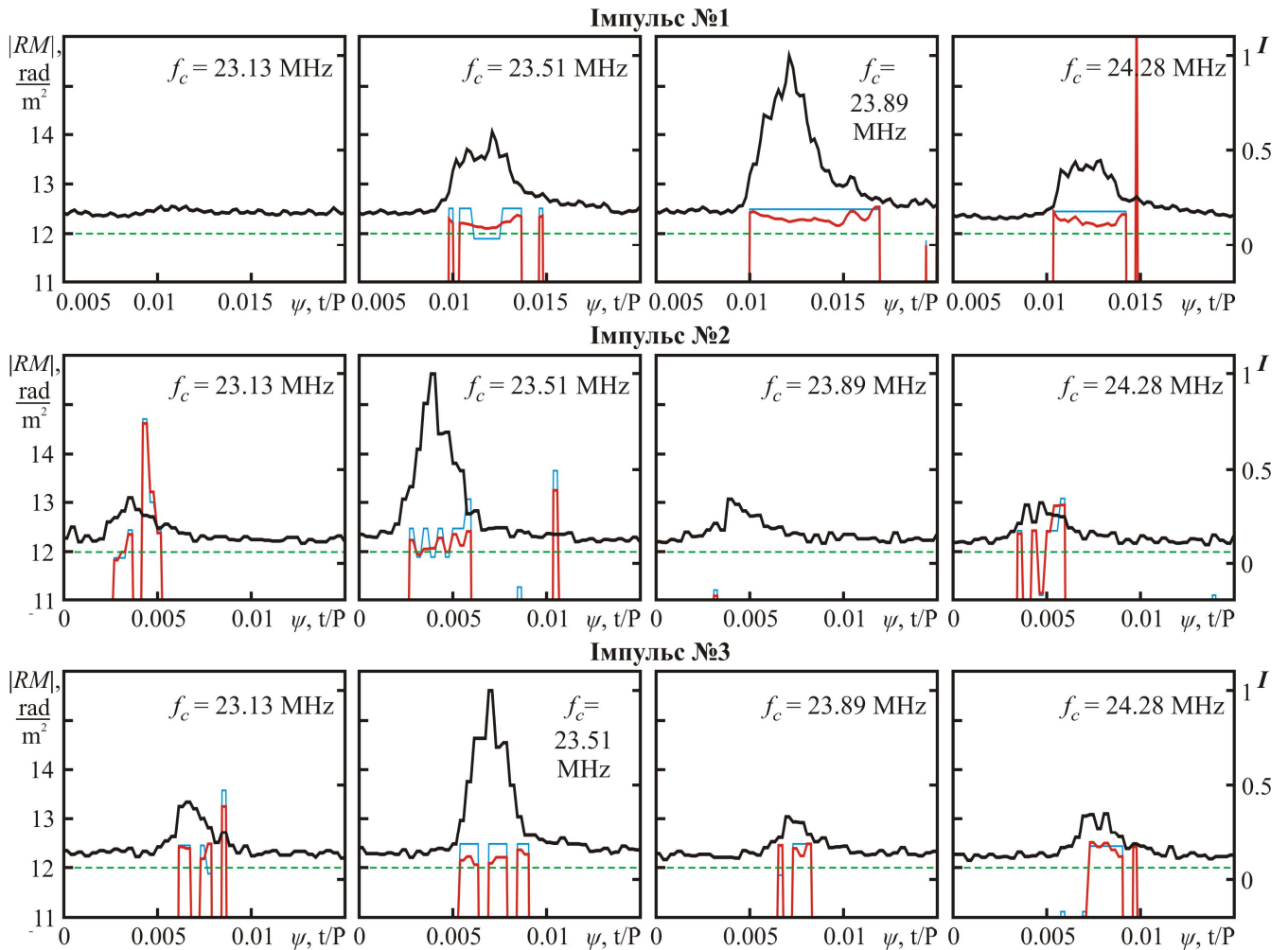


Рис. 7 Хід модуля RM в залежності від фази імпульсу на фоні його профілю (чорна крива) в 4 піддіапазонах для 3 аномально інтенсивних імпульсів пульсара J0814+7429 (B0809+74). Первинні оцінки міри обертання позначені синьою кривою, покращені оцінки, які отримані з застосуванням розробленого методу, позначені червоною кривою. Зеленим показано рівень $RM = 12$ рад/м²

На профілях модулю міри обертання на рис. 7 не спостерігається вираженого тренду. Видно, що в деяких піддіапазонах співвідношення сигнал/шум було недостатнім для коректних оцінок модуляції інтенсивності. Але цікавим є той факт, що навіть метод Фур'є аналізу (синя крива) показав дискретні зміни міри обертання в часових масштабах одного імпульсу, які потім були згладжені завдяки новому розробленому методу (червона крива). Це доводить, що новий метод виявився значно чутливішим до змін міри обертання, але для повноцінної оцінки поведінки міри обертання нам треба набрати більшу статистику.

Третім пульсаром, що розглядався, був J0953+0755. Цей пульсар має високу ймовірність реєстрації аномально інтенсивних імпульсів. В ході спостережень на радіотелескопі УТР-2 було зареєстровано серію аномально інтенсивних імпульсів, але в даній роботі досліджувався найінтенсивніший з них. Цей унікальний імпульс представлено на рис. 8 у вигляді динамічних спектрів (Рис. 8а, б). Незвичність цього імпульсу полягає в наявності двох пар компонент з різними значеннями дисперсійної часової затримки.

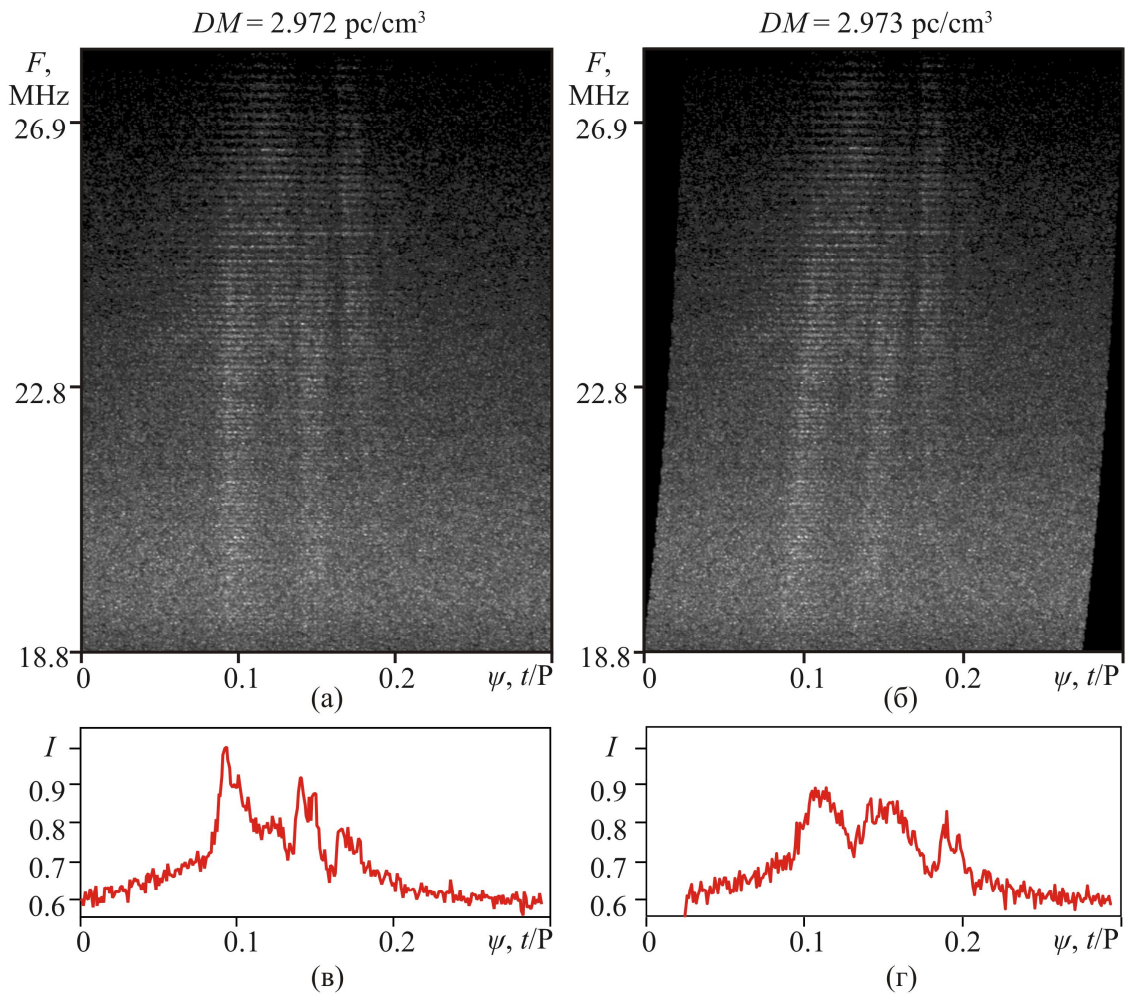


Рис. 8 Аномально інтенсивний імпульс пульсара J0953+0755, представлений на динамічних спектрах (а, б) та усереднених в смузі частот індивідуальних профілях імпульсів (в,г) для двох значень DM

Імпульс також було розділено на піддіапазони, в яких були отримані оцінки модуля міри обертання в залежності від фази імпульсу. Середні оцінки модуля міри обертання для цього пульсару в декаметровому діапазоні склали $|RM| = 2.4 \pm 0.3$ рад/м².

Оцінки ходу модуля міри обертання вздовж профілів імпульсів в піддіапазонах показано на рис. 9. Цікавим є те, що різниця міри обертання в двох випадках не вплинула на оцінки міри обертання, вони залишилися на одному рівні. Спостерігаються тільки деякі відмінності стрибків міри обертання на окремих фазах імпульсу.

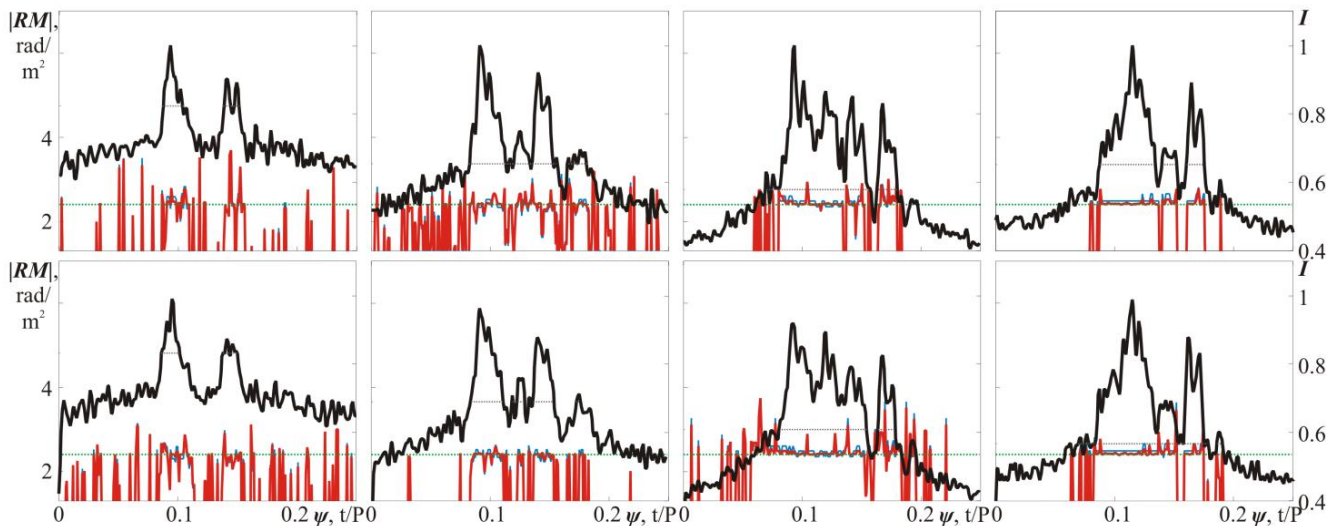


Рис. 9 Профілі $|RM(f_c, \psi)|$ пульсара J0953+0755 (B0950+08) верхня панель – DM_1 , нижня панель – DM_2 . Чорна крива представляє профіль імпульсів в піддіапазонах, синя крива показує попередні оцінки RM , червона крива відтворює оцінку RM , отриману новим чутливим методом, зелена лінія показує рівень міри обертання 2.4 рад/м², сіра штрихова лінія в області імпульсу показує рівень інтенсивності, на якому оцінки RM є найрепрезентативніші

Таким чином в третьому розділі новий чутливий метод оцінки міри обертання в часових масштабах одного імпульсу було застосовано для аналізу реально зареєстрованих аномально інтенсивних імпульсів трьох найближчих до Землі пульсарів.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених комплексних досліджень досягнуто головну мету роботи — отримано оцінки швидких змін міри обертання в масштабах одного імпульсу для аномально інтенсивних імпульсів найближчих до Землі пульсарів. Це дозволить в найближчий час провести зондування навколопульсарної плазми та розширить наші знання в області моделей магнітосфери пульсара.

Головними оригінальними результатами роботи є наступні:

1. Вперше в світі визначено абсолютне значення міри обертання для пульсара J0243+6257. Модуль міри обертання складає 4.353 ± 0.3 рад·м⁻². Визначення цього параметру зроблене за допомогою радіотелескопу УТР-2 в

діапазоні 16 – 32 МГц. В інших частотних діапазонах значення цієї величини не оцінювалося, тому не зазначено в жодних каталогах на даний час.

2. Вперше в декаметровому діапазоні дано оцінки абсолютного значення міри обертання для пульсарів J0814+7429 (B0809+74), J0953+0755 (B0950+08). В інших частотних діапазонах оцінки цієї величини близькі до отриманих, що підтверджує достовірність результатів досліджень та доцільність застосування розробленого методу для оцінки міри обертання в декаметровому та метровому діапазонах.

3. Вперше відкриті швидкі зміни міри обертання в залежності від фази індивідуального імпульсу для найближчих до Землі пульсарів. До цього часу не застосовувався підхід, в якому міра обертання має динамічний, а не сталий характер в часових межах індивідуального імпульсу. Наявність швидких змін міри обертання була підтверджена завдяки аналізу аномально інтенсивних імпульсів за допомогою розробленого чутливого до таких змін методу оцінки цієї величини.

4. Розроблено новий метод визначення швидких змін міри обертання в масштабах одного імпульсу у декаметровому діапазоні, що дає рекордно малу методологічну відносну похибку –40 дБ. Оцінки швидких змін міри обертання при цьому мають набагато вищу точність визначення, ніж оцінки середнього значення. Метод дозволяє отримати оцінки міри обертання навіть при аналізі даних з радіотелескопа, який реєструє лише одну лінійну поляризацію. Новий метод є універсальним, та може застосовуватися для аналізу даних інших радіотелескопів близького частотного діапазону. Чутливість методу дозволяє визначати та досліджувати «миттєві» значення міри обертання в часових масштабах ~ 0.3 мс.

5. Розглянуто можливості зондування найближчого до пульсара середовища – верхньої магнітосфери та пульсарного вітру. Для трьох обраних пульсарів J0242+6256, J0814+7429 (B0809+74), J0953+0755 (B0950+08) були отримані профілі міри обертання в залежності від фази імпульсу.

Загалом отримані результати підтверджують необхідність проведення поляризаційних досліджень аномально інтенсивних імпульсів радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні та показують переваги низькочастотного діапазону для спостереження тонких проявів ефектів поширення. Слід зауважити, що це стосується тільки тих близьких до Землі пульсарів, які випромінюють аномально інтенсивні імпульси, а значення міри розсіяння в напрямку на ці пульсари є відносно малими.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в наукових фахових виданнях України:

1. Ульянов О. М., **Шевцова А. И.**, Скорик А. О. Поляризационное зондирование магнитосферы пульсаров. *Изв. Крымской Астрофиз. Обс.* 2013. Т. 109, № 4. С. 159–168. (*Особистий внесок здобувача: участь у при розробці методів моделювання поляризованого радіовипромінювання та середовища поширення, комп'ютерне моделювання, підготовка матеріалів для публікації, написання та оформлення статті*).
2. Ульянов О. М., **Шевцова А. И.**, Скорик А. А. Алгоритмы определения поляризационных параметров радиоизлучения пульсаров. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2014. Т. 19, № 2. С. 101–110. (*Особистий внесок здобувача: розробка алгоритмів визначення поляризаційних параметрів радіовипромінювання пульсарів, комп'ютерне моделювання, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті*).
3. Vasylieva Ia. Y., Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Zarka P., Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Skoryk A. O. Decameter pulsar/transient survey of northern sky. First results. *Radio physics and radio astronomy.* 2014. Vol. 19, № 3. P. 197–205. (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2, участь в обговоренні результатів та в написанні тексту статті*).
4. Скорик А. А., Ульянов О. М., Захаренко В. В., **Шевцова А. И.**, Васильева Я. Ю., Плахов М. С., Кравцов И. П. Тонкая структура аномально интенсивных импульсов пульсара В0809+74 в дециметровом диапазоне. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2017. Т. 22, № 2. С. 93–111. (*Особистий внесок здобувача: спостереження пульсара В0809+74 на радіотелескопі УТР-2, вторинна обробка імпульсів, участь в обговоренні результатів, підготовка тексту до публікації*).
5. Ульянов О. М., **Шевцова А. И.**, Єрін С. М. Визначення знаку міри обертання при реєстрації однієї лінійної поляризації радіовипромінювання пульсарів. *Радиофизика і радиоастрономия.* 2020. Т. 25, № 4. С. 253–267. DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.04.253> (*Особистий внесок здобувача: розробка алгоритмів оцінки параметрів, спостереження на радіотелескопі УТР-2, обробка аномально інтенсивних імпульсів, участь в обговоренні нових методів, підготовка матеріалів статті, написання тексту статті*).

Наукові праці в науковому виданні України, що індексується в міжнародних наукометричних базах:

6. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Zakharenko V. V., Skoryk A. O., Vasylieva I. Y., Plakhov M. S. Time and Polarization Radiation Characteristics of PSR J0242+6256 at the Decameter Wavelength Range. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies.* 2018. Vol. 34, Iss. 4. P. 174–183. <https://doi.org/10.3103/S0884591318040062> (SCOPUS, Web of Science) (переклад українського видання: Ульянов О. М., **Шевцова А. И.**,

Захаренко В. В., Скорик А. А., Васильєва Я. Ю., Плахов М. С. Временные и поляризационные характеристики радиоизлучения PSR J0242+6256 в декаметровом диапазоне. *Кинематика и физика небесных тел*. 2018. Т. 34, № 4. С. 14–29) (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень пульсара J0242+6256 на радіотелескопі УТР-2, вторинна обробка аномально інтенсивних імпульсів з метою оцінки середнього значення та швидких змін міри обертання, створення ілюстрацій, написання тексту статті, оформлення статті*).

Наукові праці в зарубіжних спеціалізованих виданнях:

7. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Mukha D. V., Seredkina A. A. Investigation of the Earth Ionosphere Using the Radio Emission of Pulsars. *Baltic Astronomy*. 2013. Vol. 22, Iss. 1. P. 53–65. doi: <https://doi.org/10.1515/astro-2017-0147> (SCOPUS, Web of Science) (*Особистий внесок здобувача: розробка моделей, комп'ютерне моделювання, підготовка рисунків та тексту статті до публікації*).
8. Ulyanov O. M., Skoryk A. O., **Shevtsova A. I.**, Plakhov M. S., Ulyanova O. O. Detection of the fine structure of the pulsar J0953+0755 radio emission in the decameter wave range. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. Vol. 455, Iss. 1. P. 150–157. (SCOPUS, Web of Science) (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень пульсара J0953+0755 на радіотелескопі УТР-2, обробка аномально інтенсивних імпульсів, підготовка тексту та рисунків статті до публікації*).
9. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovsky V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., **Shevtsova A.**, Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Shevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshin O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Experimental Astronomy*. 2016. Vol. 42, Iss. 1. P. 11–48. (SCOPUS, Web of Science). (*Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2, обробка даних, участь у створенні програм обробки, участь у написанні статті*).
10. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., **Shevtsova A.**, Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M. Digital Receivers for Low-

Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *Journal of Astronomical Instrumentation*. 2016. Vol. 5, Iss. 4. Art. 1641010. (SCOPUS, Web of Science). *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень на радіотелескопі УТР-2, обробка даних, участь в обговоренні результатів, участь у написанні статті).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Ульянов О. М., **Шевцова А. И.**, Середкина А. А. Поляризационное зондирование магнитосферы пульсаров // Электромагнитные методы исследования окружающего пространства : материалы 1 укр. конф., 25–27 вересня 2012 р., Харків, 2012. С. 286–288. *(Особистий внесок здобувача: проводила моделювання сигналу та середовища поширення, брала участь в обговоренні отриманих результатів та готувала всі матеріали для стендової доповіді).*
12. Ulyanov O. M.; **Shevtsova A. I.**; Seredkina A. A. Polarization sounding of the pulsar magnetosphere // Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years : Proceedings of the 291st Symposium of the International astronomical union, 20–24 August 2012, Beijing, China, 2012. P. 530–532. *(Особистий внесок здобувача: проводила моделювання сигналу та середовища поширення, брала участь в обговоренні отриманих результатів та готувала всі матеріали для доповіді).*
13. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Seredkina A. A. Polarization sounding of pulsar magnetosphere // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : Proceedings of the XII Kharkiv Young Scientist Conference, 4–7 December 2012, Kharkiv, 2012. — CD-ROM. *(Особистий внесок здобувача: проводила моделювання сигналу та середовища поширення, брала участь в обговоренні отриманих результатів та готувала матеріали для доповіді).*
14. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Mukha D. V., Seredkina A. A. Investigation of the earth ionosphere using the radio emission of pulsars // Advances in Radio Astronomy in Near-Earth Environment : Proceedings of the Ventspils International Radio Astronomy Conference, 13–15 August 2012, Ventspils, Latvia, 2012. P. 53–65. *(Особистий внесок здобувача: розробляла модель імпульсного поляризованого випромінювання пульсарів під впливом ефектів поширення, брала участь в обговоренні результатів, готувала матеріали для виступу та публікації тез доповіді на конференції).*
15. **Shevtsova A.** Accurate methods for determining the parameters of radio pulse propagation medium // 43rd Young European Radio Astronomers Conference, 30 September–3 October 2013, Bielefeld, Germany, 2013. *(Особистий внесок здобувача: проводила моделювання сигналу та середовища поширення, брала участь в обговоренні отриманих результатів та готувала всі матеріали для доповіді).*
16. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Seredkina A. A. The methods of polarization sounding of the pulsar magnetosphere // Cosmic magnetic fields: Legacy of A.B. Severny : Proceedings of the COSPAR Symposium, 1–6 September 2013, Nauchny, Ukraine, 2013. *(Особистий внесок здобувача: проводила моделювання сигналу та середовища поширення, обробляла дані спостережень пульсарів, готувала всі матеріали доповіді).*

17. Ульянов О. М., **Шевцова А. И.**, Середкина А. А. Определение поляризационных параметров радиоизлучения пульсаров // 13-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology”, 19–25 August 2013, Odesa, 2013. *(Особистий внесок здобувача: проводила моделювання сигналу та середовища поширення, обробляла дані спостережень пульсарів, готувала матеріали доповіді).*
18. Skoryk A. O., Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.** Detection of a fine structure of the pulsar J0953+0755 radiation in the low frequency range radio astronomy // Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics : Proceedings of the 14th Kharkiv Young Scientist Conference, 14–17 October 2014, Kharkiv, 2014. – CD-ROM. *(Особистий внесок здобувача: приймала участь в обговоренні отриманих результатів, готувала матеріали доповіді).*
19. **Shevtsova A.**, Ulyanov O., Skoryk A., Zakharenko V., Vasylieva I., Kravtsov I. Rotation Measure Calculation Algorithm for Pulse Radiation in Decameter Range. // Applied Physics : Proceedings of International Young Scientists Forum, 29 Sept.–2 Oct. 2015, Dnipropetrovsk, 2015. Art. RAA-9. (SCOPUS) *(Особистий внесок здобувача: проводила спостереження пульсара, моделювання сигналу та середовища поширення, брала участь в обговоренні отриманих результатів та готувала всі матеріали для доповіді).*
20. Skoryk A., Ulyanov O., Zakharenko V., **Shevtsova A.**, Vasylieva Y., Kravtsov I., Plakhov M. Fine Structure of the Pulsar Decameter Radiation as the Probe of the Propagation Medium Fine Structure of the Pulsar Decameter Radiation as the Probe of the Propagation Medium // Applied Physics : Proceedings of International Young Scientists Forum, 29 Sept.–2 Oct. 2015, Dnipropetrovsk, 2015. Art. RAA-4. *(Особистий внесок здобувача: брала участь в обговоренні отриманих результатів, та разом із співавторами готувала матеріали для публікації тез конференції).*
21. Skoryk A. O., Ulyanov O. M., Zakharenko V. V., **Shevtsova A. I.**, Vasylieva Y. U., Kravtsov I. P., Plakhov M. S. Fine structure of the PSR B0809+74 individual pulses in decameter wave range // Applied Physics : Proceedings of International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), 10–14 October 2016, Kharkiv, 2016. CD of Abstracts. RAA-3. *(Особистий внесок здобувача: проводила спостереження пульсара, участь в обговоренні результатів роботи і підготовці матеріалів для статті).*
22. Zakharenko V. V., Kravtsov I. P., Vasylieva I. Y., Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Skoryk A. O., Mykhailova S. S., Konovalenko O. O., Zarka P. Decameter survey of pulsars and transients of the Northern Sky. Current status // Proceedings of 23rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, 25–30 April 2016, Kyiv, 2016. Book of Abstracts, P. 16. *(Особистий внесок здобувача: обробка даних, проведення спостережень, участь у розробці програм обробки, підготовка доповіді та тез для публікації).*
23. Kravtsov I. P., Zakharenko V. V., Vasylieva I. Y., Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Skoryk A. O., Mykhailova S. S. Decameter Pulsars and Transients Survey of the Northern Sky. Observations and Data Processing // Proceedings of 9th

International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves MSMW'2016, 21–24 June 2016, Kharkiv, 2016. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538020 (SCOPUS). *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень, участь в обговоренні результатів, підготовка доповіді та конференційної статті для публікації).*

24. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Zakharenko V. V., Skoryk A. O., Vasylieva Ia. Y. Rotation measure estimation for anomalously intense pulses of PSR J0243+6257. // 17th Gamow Conference-School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, 13–20 August 2017, Odesa, 2017. *(Особистий внесок здобувача: проводила спостереження пульсара на радіотелескопі УТР-2, проводила обробку аномально інтенсивних імпульсів, готувала матеріали доповіді).*

25. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Zakharenko V. V., Skoryk A. O., Vasylieva Ia. Y. Rotation measure of individual pulses of PSR J0243+6257 // Proceedings of IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, 17–20 October 2017, Lviv, 2017. *(Особистий внесок здобувача: проводила спостереження пульсара на радіотелескопі УТР-2, проводила обробку аномально інтенсивних імпульсів, готувала матеріали доповіді).*

26. Skoryk A. O., Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.** Anomalously intense pulses as a pulsar magnetosphere probes // Proceedings of IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, 17–20 October 2017, Lviv, 2017. *(Особистий внесок здобувача: проведення спостережень, участь в обговоренні результатів, підготовка доповіді та конференційної статті для публікації).*

27. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Skoryk A. O. Polarization of the Fine Structure of Pulsar Radio Emission at Low Frequencies. // 18-th Odesa International Astronomical Gamow Conference-School Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology, 12–18 August 2018, Odesa, 2018. *(Особистий внесок здобувача: проводила спостереження пульсара на радіотелескопі УТР-2, проводила обробку аномально інтенсивних імпульсів, готувала матеріали доповіді).*

28. Ulyanov O., **Shevtsova A.**, Skoryk A., Plakhov M. 50-Years of Pulsars Research in Ukraine. // Workshop, 23–30 March 2019, Nançay Observatory, France, 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.16389.19685. *(Особистий внесок здобувача: брала участь в обговоренні результатів, готувала матеріали доповіді).*

29. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Zakharenko V. V., Konovalenko A. A., Zarka P., Griebmeier J.-M., Skoryk O. A., Kravtsov I. P. Broadband Probing of the Upper Magnetospheres of Pulsars // 19th Gamow International Conference in Odessa: “New Trends in Cosmology, Astrophysics and HEP after Gamow” and 19th Gamow Summer School: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology”, 11–19 August 2019, Odesa, 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.24474.59849. *(Особистий внесок здобувача: проводила спостереження пульсарів на радіотелескопі УТР-2, проводила обробку аномально інтенсивних імпульсів, готувала матеріали доповіді).*

30. Ulyanov O. M., **Shevtsova A. I.**, Zakharenko V. V., Skoryk A. O., Yerin S. N. Rotation measure profiles for anomalously intense pulses of PSR B0950+08 and PSR B0809+74 // XX Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology”, 9–16 August 2020, Odesa, 2020. *(Особистий внесок здобувача: проводила спостереження пульсарів на радіотелескопі УТР-2, проводила обробку аномально інтенсивних імпульсів, готувала матеріали доповіді).*
31. Ulyanov O., **Shevtsova A.**, Yerin S., Konovalenko O., Zakharenko V., Griebmeier J.-M., Zarka P., Skoryk A. Hybrid algorithm of dispersion delay retrieval and removal in radio astronomy // 10th international Kharkiv symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves MSMW'2020, 21–25 September 2020, Kharkiv, 2020. (online due to COVID-19). doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252572. *(Особистий внесок здобувача: проводила спостереження пульсара B0950+08 на радіотелескопі УТР-2, проводила обробку аномально інтенсивних імпульсів, брала участь в розробці методу та його реалізації, готувала матеріали доповіді).*

АНОТАЦІЯ

Шевцова А. І. Міра обертання радіовипромінювання пульсарів у декаметровому діапазоні. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню швидких змін міри обертання радіовипромінювання найближчих до Землі пульсарів на коротких часових масштабах у декаметровому діапазоні. В дисертації запропоновано оригінальний підхід, в якому параметри середовища поширення є динамічно змінними в часових масштабах одного імпульсу. Такий підхід дозволяє оцінювати швидкі процеси у верхніх шарах магнітосфери пульсара та пульсарному вітрі. Саме в цих ділянках міра обертання, як параметр, що описує концентрацію електронів та паралельну до лінії зору індукцію магнітного поля, може змінюватися в залежності від фази індивідуального імпульсу. Параметри середовища поширення радіохвиль, розташованого далі від пульсара, є стабільними на таких часових масштабах і не можуть змінюватися так швидко.

В роботі запропонована модель поляризованого імпульсного радіовипромінювання пульсарів та модель слабо анізотропного середовища поширення (міжзоряної, міжпланетної та іоносферної плазми), що можуть бути застосовані для декаметрового діапазону довжин хвиль. Також розроблені і наведені алгоритми оцінки динамічно змінних параметрів середовища поширення радіовипромінювання та проілюстрована можливість розділення верхніх шарів магнітосфери пульсара.

Розроблені алгоритми застосовано для обробки і аналізу поляризованого радіовипромінювання зареєстрованих аномально інтенсивних імпульсів найближчих до Землі пульсарів в декаметровому діапазоні. Спостереження проводились на радіотелескопі УТР-2 в діапазоні 16-33 МГц. Тільки цей радіотелескоп з ефективною площею 150000 м^2 на 25 МГц дозволив реєструвати аномально інтенсивні імпульси пульсарів з високою часовою та частотною роздільною здатністю.

Для радіовипромінювання трьох найближчих до Землі пульсарів були отримані оцінки середніх абсолютних значень міри обертання в декаметровому діапазоні. При чому для пульсара J0242+6256 оцінки міри обертання були отримані вперше в світі. Оцінки міри обертання для J0814+7429 (B0809+74), J0953+0755 (B0950+08) близькі до отриманих на більш високих частотах.

Вперше були отримані профілі міри обертання в залежності від фази імпульсу для аномально інтенсивних імпульсів пульсарів J0242+6256, J0814+7429 (B0809+74), J0953+0755 (B0950+08). Зареєстровано швидкі зміни міри обертання в часових масштабах 0.3 мс.

Оцінка швидких змін міри обертання радіовипромінювання пульсарів на коротких часових масштабах за допомогою нового методу дозволяє аналізувати швидкі процеси в плазмі вздовж променя зору, що створює передумови для зондування верхньої магнітосфери пульсара та пульсарного вітру.

Ключові слова: аномально інтенсивні імпульси, декаметрове випромінювання пульсара, магнітне поле, магнітосфера, міра обертання, плазма, поляризаційні характеристики, радіотелескоп.

ABSTRACT

Shevtsova A. I. Rotation measure of pulsar radio emission at decameter range. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Physics and Mathematics, Speciality 01.03.02 – Astrophysics, radio astronomy. – Institute of Radio Astronomy of National Academy of Sciences of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the study of rapid changes in the rotation measure of radio radiation of pulsars closest to the Earth on short time scales in the decameter range. The dissertation proposes an original approach in which the parameters of the propagation medium are dynamically variable in the time scale of one pulse. This approach allows to analyze the rapid processes in the upper layers of the magnetosphere of the pulsar and the pulsar wind. It is in these areas that the rotation measure, as a parameter describing the electron concentration and the magnetic field induction parallel to the line of sight, can vary depending on the phase of the individual pulse. The parameters of the radio propagation medium located further from the pulsar are stable at such time scales and cannot change so quickly.

The model of polarized pulsed radio pulsar radiation and a model of a weakly anisotropic propagation medium (interstellar, interplanetary and ionospheric plasma), which can be applied to the decameter wavelength range is proposed. Algorithms for estimating dynamically changing parameters of the radio propagation medium are also developed and presented, and the possibility of sounding the upper layers of the pulsar magnetosphere is illustrated.

The developed algorithms are used for processing and analysis of polarized radio radiation of registered anomalously intense pulses of pulsars closest to the Earth in the decameter range. Observations were held on a UTR-2 radio telescope in the range of 16-33 MHz. Only this radio telescope with an effective area of 150,000 m² at 25 MHz allow to record anomalously intense pulses of pulsars with high time and frequency resolution in this range.

For the radio emission of the three pulsars closest to the Earth, estimates of the average absolute values of the rotation measure in the decameter range were obtained. Moreover, for the pulsar J0242 + 6256 estimates of rotation measure were obtained for the first time in the world. Estimates of the degree of rotation for J0814 + 7429 (B0809 + 74), J0953 + 0755 (B0950 + 08) are close to those obtained at higher frequencies.

Estimation of rapid changes in the rotation measure of radio pulsars on short time scales using a new method allows to analyze rapid processes in plasma along the line of sight, which creates the preconditions for probing the upper magnetosphere of the pulsar and pulsar wind.

Key words: anomalously intense pulses, decameter pulsar radiation, magnetic field, magnetosphere, rotation measure, plasma, polarization characteristics, radio telescope.